

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 10-186104  
(43)Date of publication of application : 14.07.1998

(51)Int.Cl. G02B 1/11

B32B 7/02

(21)Application number : 09-132535

(71)Applicant : KAMIYA TAKESHI  
RI MASANE  
FURUKAWA ELECTRIC CO  
LTD:THE

(72)Inventor : KAMIYA TAKESHI  
RI MASANE  
UCHIYAMA SEIJI

(22) Date of filing : 22.05.1997

(72)Inventor : KAMIYA TAKESHI  
RI MASANE  
UCHIYAMA SEIJI

(30)Priority

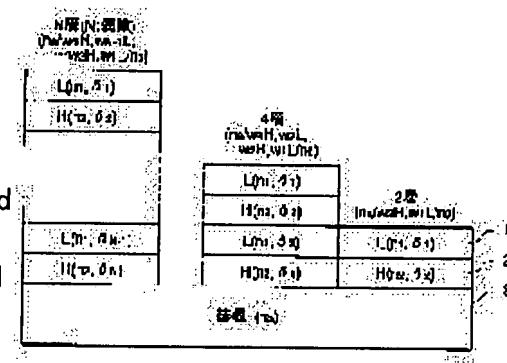
Priority number : 08282598      Priority date : 24.10.1996      Priority country : JP

(54) MULTI-LAYERED ANTI-REFLECTION FILM AND OPTICAL ELEMENT

(57) Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To secure a low reflection factor over a wide wavelength range by providing a reflection factor spectrum with wide-band low-reflection-factor characteristics which have two throughs of reflection factor and a reflection factor peak between them in a necessary wavelength band.

**SOLUTION:** Two kinds of thin film consisting of a low-refractive-index material 1 and a high-refractive-index material 2 respectively are laminated alternately on an end surface of the substrate 3 of a semiconductor laser element, etc., to form a multi-layered structure of two layers, four layers, or N layers (N: even number). A mismatch condition of optical admittance is applied and layer thickness is determined to decide the structure of a multi-layered film with reflection factor spectrum characteristics which have two throughs with finite low values and a reflection factor peak between the depressions. The reflection factor can be suppressed low



over the wide wavelength range including the two troughs on condition that the reflection factor at the reflection factor peak is suppressed below the permissible limit of an antireflection film.

---

**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平10-186104

(43)公開日 平成10年(1998)7月14日

(51)Int.Cl.<sup>6</sup>

G 0 2 B 1/11  
B 3 2 B 7/02

識別記号

1 0 3

F I

G 0 2 B 1/10  
B 3 2 B 7/02

A  
1 0 3

審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 8 頁)

(21)出願番号 特願平9-132535

(22)出願日 平成9年(1997)5月22日

(31)優先権主張番号 特願平8-282598

(32)優先日 平8(1996)10月24日

(33)優先権主張国 日本 (JP)

(71)出願人 596153726

神谷 武志

東京都文京区本郷7丁目3番1号 東京大学工学部電子工学科内

(71)出願人 596153737

李 正根

東京都目黒区五本木3丁目11番5号 サンハイツ202

(71)出願人 000005290

古河電気工業株式会社

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号

(74)代理人 弁理士 長門 侃二

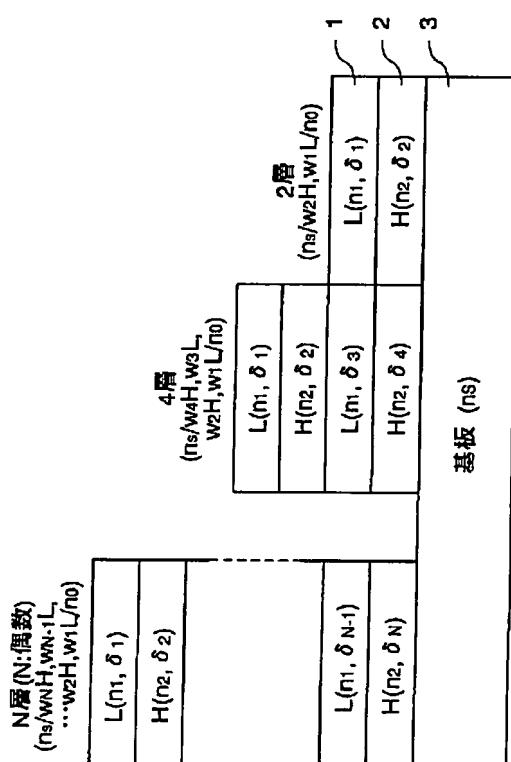
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 多層反射防止膜および光素子

(57)【要約】

【課題】 広い波長帯域に亘って低反射率を確保できる多層反射防止膜と、その多層膜構造の最適化の設計手法を提供する。

【解決手段】 複数種の屈折率の異なる材料からなる薄膜を積層形成した多層構造の反射防止膜であって、所要波長帯域において反射率の低い2つの谷と、その谷の間に反射率ピークを有する反射率スペクトルを持たせることで広帯域な低反射率特性を実現する。また光学アドミッタンス不整合条件を導入した有限な値を持つ反射率の計算と、その帯域評価に基づく最適化アルゴリズムにより各層の厚みを決定することで、W字形状またはU字形状の反射率スペクトルを持つ最適化された多層膜構造を得る。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】複数種の屈折率の異なる材料からなる薄膜を積層形成した多層構造の反射防止膜であって、所要波長帯域において反射率の低い2つの谷と、その間に反射率ピークを有する広帯域な低反射率特性を有することを特徴とする多層反射防止膜。

【請求項2】前記広帯域な低反射率特性は、光学アドミタンス不整合条件と有限な反射率の帯域評価に基づく最適化アルゴリズムにより決定された各層の厚みにより規定されることを特徴とする請求項1に記載の多層反射防止膜。

【請求項3】反射率が $10^{-3}$ 以下に設定されていることを特徴とする請求項1または2に記載の多層反射防止膜。

【請求項4】 $10^{-3}$ 以下の低反射率の波長帯域が30nm以上に設定されていることを特徴とする請求項1または2に記載の多層反射防止膜。

【請求項5】反射率が $10^{-4}$ 以下に設定されていることを特徴とする請求項1または2に記載の多層反射防止膜。

【請求項6】 $10^{-4}$ 以下の低反射率の波長帯域が15nm以上に設定されていることを特徴とする請求項1または2に記載の多層反射防止膜。

【請求項7】反射率が $10^{-5}$ 以下に設定されていることを特徴とする請求項1または2に記載の多層反射防止膜。

【請求項8】 $10^{-5}$ 以下の低反射率の波長帯域が10nm以上に設定されていることを特徴とする請求項1または2に記載の多層反射防止膜。

【請求項9】反射率が $10^{-6}$ 以下に設定されていることを特徴とする請求項1または2に記載の多層反射防止膜。

【請求項10】 $10^{-6}$ 以下の低反射率の波長帯域が5nm以上に設定されていることを特徴とする請求項1または2に記載の多層反射防止膜。

【請求項11】請求項1乃至10のいずれかに記載の多層反射防止膜を、端面に形成したことを特徴とする光素子。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、広帯域な低反射率特性を実現し得る多層反射防止膜と、その多層反射防止膜を備えた光素子に関する。

## 【0002】

【関連する背景技術】半導体レーザ増幅器においては、その端面反射率を $10^{-3}$ 以下にしてファブリ・ペローモード発振を抑制する必要がある。また波長可変外部共振型モードロックレーザにあっては、その端面での反射率を $10^{-5}$ 以下と言う極低反射率に保つ必要がある。このような極低反射率の反射防止膜としては、従来、例えば

厚みを $\lambda_0/4n_r$ （但し、 $\lambda_0$ は中心波長、 $n_r$ は誘電体の屈折率）とした単層誘電体膜が用いられている。ちなみにこの種の反射防止膜を形成する誘電体材料としては、基板の屈折率 $n_s$ に対して [ $n_r = (n_s)^{1/2}$ ] なる屈折率、またはこれに近い屈折率を持つものが用いられている。

## 【0003】

【発明が解決しようとする課題】ところで半導体レーザの場合、単層誘電体膜を用いて、特に $10^{-5}$ 以下の超低反射率を実現しようとすると、例えば基板の屈折率 $n_s$  [= 3.286]に対して誘電体材料の屈折率 $n_r$ を [= 1.813] とするには、理論計算上においてもその波長帯域を高々 9 nm 程度しか確保することができない。しかも実際的には [ $n_r = (n_s)^{1/2}$ ] なる関係を満たす屈折率の誘電体材料は殆どなく、また実際の反射膜（誘電体膜）形成時においては屈折率の揺らぎが生じるので、所望とする極低反射率を得ることが困難である。しかもその波長帯域も上記理論計算で求められる 9 nm よりも狭くなる。

【0004】これに対して誘電体膜を多層構造化して広帯域の反射防止膜を形成することが提唱されている。しかしこの場合、一般的にはその層数 N と同じ数の複数種類の誘電体材料が必要である。しかも多層構造膜の設計に際してはシステムティックの設計手法がないので、目標とする中心波長 $\lambda_0$ を設定した上で、それに必要な材料の屈折率およびその層厚を各層毎に決定する必要があった。この為、その設計に多大な時間と労力を要し、例えばスーパーコンピュータを用いて演算処理を実行する場合であっても、数時間～数日以上の計算時間を要した。

【0005】また上述した設計の下で実現される多層構造の反射防止膜の目標波長域での反射率スペクトルは、通常、その目標中心波長 $\lambda_0$ を谷（ボトム）とした（1つの谷を有する）急峻な V 字形状となり、低反射率の波長帯域もさほど広くない。即ち、誘電体膜からなる反射防止膜を形成するに際しては、一般的にその光学アドミタンス Y が [ $n_r$ ]（例えば空気の場合には、 $n_r = 1$ ）となる光学アドミタンス整合条件を用いて、その反射率が [0] となるように膜厚（層厚）設計が行われる。これ故、その反射率スペクトルは、設定した中心波長 $\lambda_0$ での反射率が [0] となる狭い放物線形状となり、所望とする反射率以下での波長帯域が狭いと言う問題があつた。

【0006】本発明はこのような事情を考慮してなされたもので、その目的は、広い波長域に亘って低反射率を確保することのできる多層反射防止膜と、この多層反射防止膜を備えた光素子を提供することにある。また本発明の別の目的は、上記多層反射防止膜の構造設計（各層の厚み決定）を容易ならしめ、所要とする波長域において、所要とする低反射率を実現し得る多層反射防止膜を

提供することにある。

### 【0007】

【課題を解決するための手段】上述した目的を達成するべく本発明に係る多層反射防止膜は、複数種の屈折率の異なる材料からなる薄膜を積層形成した多層構造の反射防止膜であって、その反射率スペクトルが、所要波長帯域において反射率の低い2つの谷と、その間に反射率ピークを有する広帯域な低反射率特性を有することを特徴とするものである。例えば高屈折率材料と低屈折率材料とからなる2種類の薄膜を交互に積層形成し、その低反射率波長域に形成される2つの谷の間に生じる反射率ピークを目標反射率以下とすることで、広い波長帯域に亘って所要とする低反射率を実現したものである。

【0008】特に請求項2に記載するように、前記広帯域な低反射率特性を、光学アドミタンス不整合条件を与えた有限な反射率の帯域評価に基づく最適化アルゴリズムにより各層の厚みを決定することで、その反射率スペクトルに低反射率の2つの谷を持たせ、且つその谷の間に目標反射率以下の反射率ピークを持たせるようにしたことの特徴としている。

【0009】そしてその反射率を $10^{-3}$ 以下、 $10^{-4}$ 以下、 $10^{-5}$ 以下、 $10^{-6}$ 以下にそれぞれ設定したり、或いはその低反射率の波長帯域を300nm以上、150nm以上、100nm以上、50nm以上にそれぞれ設定することを特徴としている。望ましくは反射率が $10^{-3}$ 以下でその波長帯域が300nm以上の反射防止膜、反射率が $10^{-4}$ 以下でその波長帯域が150nm以上の反射防止膜、反射率が $10^{-5}$ 以下でその波長帯域が100nm以上の反\*

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left( \prod_{r=1}^N \begin{bmatrix} \cos \delta_r & (i \cdot \sin \delta_r) / n_r \\ i n_r \cdot \sin \delta_r & \cos \delta_r \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \quad \begin{cases} k=1 \text{ if } r=\text{odd} \\ k=2 \text{ if } r=\text{even} \end{cases}$$

【0014】但し、光学アドミタンスYは[C/B]として表され、[Y=1]なるときの反射率は[0]となる。

尚、上式において $n_1$ は低屈折率材料1の屈折率、 $n_2$ は高屈折率材料2の屈折率、 $n_s$ は基板3の屈折率であつて、 $\delta_r$ は中心波長を $\lambda_0$ としたとき、

$$\delta_r = 2\pi n_r d_r / \lambda_0, \quad d_r = w_r H \text{ (or } w_r L \text{)} \quad (r = 1, 2, \dots, N)$$

$$H = \lambda_0 / 4 n_2, \quad L = \lambda_0 / 4 n_s$$

として与えられる。ちなみにこの計算で初期設定されるパラメータは、N、 $\lambda_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_s$ であり、また計算によって求めようとするパラメータは $w_r$ （厚み係数）である。

※

$$\begin{cases} |Re(Y - n_s)| \leq \Delta \\ |Im(Y - n_s)| \leq \Delta \end{cases}$$

; 光学アドミタンス不整合条件

\* 射防止膜、或いは反射率が $10^{-6}$ 以下でその波長帯域が50nm以上の反射防止膜とすることを特徴としている。

【0010】更には請求項11に示すように、上述した反射率特性を有する多層反射防止膜を、例えば半導体レーザ増幅器等の光素子の端面に形成したことを特徴としている。

### 【0011】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明に係る多層反射防止膜および光素子の一実施形態について説明する。本発明に係る多層反射防止膜は、図1に示すよ

うに低屈折率材料1および高屈折率材料2からなる2種類の薄膜を、半導体レーザ素子等の基板3の端面（レーザ端面）に交互に積層形成したもので、2層、4層、或いはN層（Nは偶数）の多層膜構造をなす。これらの各薄膜層の厚みは、例えば図2および図3に示すように、光学アドミタンス不整合条件を与えた有限な反射率の帯域評価に基づく最適化アルゴリズムに基づく計算処理によって決定される。この最適化アルゴリズムによる計算処理については後述するよう、パーソナルコンピュータ程度の簡単な計算機によって実行される。またここで計算される各層の厚みは、一般的に用いられる $\lambda_0 / 4 n_r$ （4分の1光学波長）の厚みではなく、後述する厚み係数（パラメータ） $w_r$ として求められる。

【0012】さてN層多層膜の特性マトリックスは、一般的には次のように表される。

### 【0013】

#### 【数1】

※ 【0015】さて本発明に係る各薄膜層の厚み決定の為の最適化アルゴリズムは、基本的には上式に基づいて実行され、図2に示すように先ずパラメータN、 $\lambda_0$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_s$ を初期設定することから開始される【ステップS1】。そして計算処理の第1段階として、N層からなる多層構造を実現する場合には、Nまでの各層の膜厚 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N$ をそれぞれ与え、次の光学アドミタンス不整合条件を満たす組み合わせ $\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N\}$ で各層の膜厚を決定する【ステップS2, S3】。

### 【0016】

#### 【数2】

スY (=C/B) と $n_s$ とのずれが前記 $\Delta$ よりも小さければ、これを解として取り出す。即ち、低屈折率材料1の層の厚み $d$ を

$$0.1L < d < 2L$$

【0017】具体的には各層の厚さの上限と下限とを2H(2L), 0.1H(0.1L)にそれぞれ制限し、その範囲内における各層の厚みの組み合わせのそれれについて前述した特性マトリックスに示される光学アドミタン

の範囲に制限し、また高屈折率材料2の層の厚みdについても

$$0.1H < d < 2H$$

の範囲に制限する。そしてこの制限された厚み範囲内においてNまでの全ての層における各厚みを、各層の基準厚みH(L)に対して規格化された厚み係数wとして、例えば0.001ステップで、その組み合わせによる薄膜構造  $\{n_r / w_n H_{n-1} L, \dots, w_2 H_1 L / a_i r\}$  の全てについて検証し、前記光学アドミタンス不整合条件を満たす組み合わせの薄膜構造を求める。

【0018】しかる後、第2段階として上述した如くして求められた係数  $w_r$  ( $r = 1, 2, \dots, N$ ) の組について、図3にその処理手順を示すように特定の波長帯域において、例えば中心波長  $\lambda_0 = 1550\text{nm}$  に対して、1350nm～1750nmの帯域において、その波長に対する反射率Rのスペクトルを求める【ステップS4】。このスペクトルR( $\lambda$ )の計算処理については、例えば上記波長領域において1nmステップでポイント的に設定された波長毎にその反射率Rを計算すれば十分である。

【0019】具体的には上記係数  $w_r$  ( $r = 1, \dots, N$ ) の組として示される多層膜の構造

$n_r / w_n H, w_{n-1} L, \dots, w_2 H, w_1 L / n_0 (a_i r)$  について、波長ステップ  $\delta_{step}$  (=1nm) 毎にその波長帯域の最小波長  $\lambda_{start}$  (=1350nm) から最大波長  $\lambda_{end}$  (=1750nm) に亘ってその反射率Rを計算し、その反射率スペクトル  $R_r(\lambda)$  を求める。

【0020】その後、第3段階として目的とする反射防止膜の特性限界として与えられる最も高い反射率  $R_{max}$  と上述した如く計算された反射率スペクトル  $R_r(\lambda)$  を波長毎に順次比較して、上記反射率  $R_{max}$  よりも低い反射率Rのポイント(波長)数を計数する【ステップS5, S6】。そしてそのポイント数から低反射率の帯域を評価し、ポイント数の最も大きい係数  $w_r$  の組を求める。最後に反射率スペクトルの中心部を、そのずれ分だけシフトし、反射防止膜の中心波長と一致させる【ステップS7】。このようにして求められる解  $w_r$  を、所望とする反射率以下(低反射率)の最も広い波長帯域を実現する反射防止膜の各層の厚みの計算結果  $w_r$  として決定する。

【0021】即ち、本発明においては上述したように、複数の薄膜層における各層の厚みについて全体的に可能な解の全てを求め、それらの解を相互に比較して最適解を求めるので、効率的に最適化された解を求めることが可能となる。これ故、従来のように各層の厚みを一点ずつ調べてその解を収束させる手法とは異なるので、簡単なパーソナルコンピュータを用いても数時間程度の演算により、効率的に最適解を求め、各層の厚みを決定することが可能となる。

【0022】さて本発明においては上述した如く多層膜における各層の厚みを計算するに際し、前述した光学ア

ドミタンスY (=C/B) を  $[n_0]$  とする光学アドミタンス整合条件に代えて、その光学アドミタンスYを所定量  $\Delta$  だけずらした光学アドミタンス不整合条件を導入している点に特徴を有する。即ち、 $|Y - n_0|$  の絶対値が所定量  $\Delta$  よりも小さい

$$|Y - n_0| < \Delta$$

と言う光学アドミタンスの不整合条件の下で前述した最適化アルゴリズムによる層厚の決定処理を行っている。

【0023】ちなみに光学アドミタンス整合条件の下で10の層厚決定処理は、最小反射率のポイント(波長)が中心波長と一致し、その値を[0]とするような層厚を求める処理からなる。これ故、目的とする波長域でのスペクトルが上記中心波長での反射率が[0]となるような幅の狭い放物線形状となる。これに対して上述した光学アドミタンスの不整合条件を導入した場合には、最小反射率となるポイント(波長)は上記中心波長からずれるか、或いはその反射率が[0]とはならない有限の値を持つことになる。これ故、前述した整合条件においては中心波長に一致した1つの解しか得られないが、不整合条件を導入した場合には前記整合条件の下での解の付近に、そのポイント(波長)が  $\Delta$  だけずれた複数の解が求められることになる。

【0024】従って光学アドミタンスの不整合条件を導入して層厚の決定処理を行う本発明によれば、所要とする波長帯域において、その反射率が有限の低い値を持つ2つの谷が生じ、且つその谷の間に反射率ピーク(山)を有する反射率スペクトル特性を持つ多層膜の構造を決定することが可能となる。特に上記反射率ピーク点での反射率Rを反射防止膜としての許容限界、つまり目的とする反射率以下に抑えるようにすれば、上記2つの谷を含む広い波長帯域に亘ってその反射率を低く抑えることが可能となり、その広帯域化を図ることが可能となる。

【0025】次に実際の材料パラメータを用いて層厚計算され、作成された4層構造の反射防止膜について説明する。この例は屈折率  $n_0$  が [3.286] の基板3上に、 $TiO_2$  ( $n_2 = 2.378$ ) と  $SiO_2$  ( $n_1 = 1.445$ ) とを交互に4層 ( $N = 4$ ) に亘って積層し、中心波長  $\lambda_0$  を 1550nm として最適化した構造の反射防止膜を形成したものである。具体的には、先ず規格化された層厚(膜厚)を 0.1 から 2 まで変化させたときの全範囲を調べるべく、

$$\delta_{step} = 0.01 \quad (w_{step} = 0.0064)$$

$$\Delta = 5$$

なる条件を設定して層厚の最適化計算処理を行った。この場合、多層膜の最適化のデザインは、要求される反射率Rによって異なるので、その要求反射率Rを  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ , 或いは  $10^{-6}$  以下としてそれぞれ設定し、各条件における最適化デザインを求めた。表1は上記条件の下で最適化された反射防止膜の構造(層厚)と、最大波長帯域とを示している。

【0026】

\* \* 【表1】

反射率 (R <sub>max</sub> )	領域	厚み係数				最大波長帯域
		w4	w3	w2	w1	
$R < 10^{-3}$	(1)	0.793	1.640	1.587	0.788	330nm
	(2)	0.852	1.983	0.383	1.192	334nm
	(3)	1.196	0.287	1.955	0.868	343nm
	(4)	1.346	0.450	0.544	1.276	315nm
$R < 10^{-4}$	(1)	0.797	1.623	1.568	0.808	180nm
	(2)	0.838	1.956	0.393	1.184	148nm
	(3)	1.205	0.294	1.915	0.874	184nm
	(4)	1.355	0.449	0.583	1.263	185nm
$R < 10^{-5}$	(1)	0.811	1.617	1.567	0.805	85nm
	(2)	0.866	1.946	0.358	1.191	89nm
	(3)	1.206	0.305	1.919	0.870	99nm
	(4)	1.338	0.456	0.579	1.259	87nm
$R < 10^{-6}$	(1)	0.809	1.617	1.566	0.809	38nm
	(2)	0.844	1.948	0.387	1.186	43nm
	(3)	1.205	0.295	1.896	0.877	50nm
	(4)	1.345	0.448	0.592	1.152	26nm

【0027】尚、表1において領域(1)～(4)は最適化によって求められる多層膜構造の、各層の層厚関係によって示される限界領域をそれぞれ示しており、領域(1)は1層目の厚みを最も薄くした場合、領域(4)は1層目を最も厚くした場合を示し、また領域(2)は2層目を最も厚くした場合、そして領域(3)は2層目を最も薄くした場合をそれぞれ示している。

【0028】次に上記領域(1)の条件を更に詳しく調べ※

※るために

$$\delta_{step} = 0.0018 \quad (w_{step} = 0.001)$$

$$\Delta = 0.001, = 0.01, = 0.1$$

なる条件を設定して層厚の最適化計算処理を行った。表2は上記条件の下で最適化された反射防止膜の構造(層厚)と、最大波長帯域とを示している。

30 【0029】

【表2】

反射率 (R <sub>max</sub> )	ずれ量△	厚み係数				最大波長帯域
		w4	w3	w2	w1	
$R < 10^{-3}$	0.001	0.632	1.514	1.422	0.690	61nm
	0.01	0.814	1.645	1.586	0.786	301nm
	0.1	0.784	1.637	1.590	0.794	334nm
$R < 10^{-4}$	0.001	0.632	1.514	1.422	0.690	19nm
	0.01	0.792	1.626	1.564	0.810	184nm
	0.1	0.797	1.623	1.569	0.807	184nm
$R < 10^{-5}$	0.001	0.632	1.514	1.422	0.690	6nm
	0.01	0.803	1.618	1.562	0.810	93nm
	0.1	0.800	1.620	1.563	0.812	104nm
$R < 10^{-6}$	0.001	0.632	1.514	1.422	0.690	1nm
	0.01	0.789	1.620	1.550	0.821	32nm
	0.1	0.801	1.619	1.561	0.814	55nm

【0030】ちなみに上記領域(1)における前述した反射率条件(仕様)毎に求められる反射率スペクトルは図50

4～図7にそれぞれ示すようになる。これらの各図に示される反射率スペクトルから明らかのように、低反射率

を実現する波長帯域は、不整合条件のずれ量 $\Delta$ を大きくするに従って大きくなる。また基準とする最大反射率 $R_{max}$ を低くする程、そのスペクトル形状がU字形状に近付き、その波長帯域が狭くなることが分かる。

【0031】しかし波長帯域が最大になると共に中心部のピークの高さも高くなり、基準とする最大反射率 $R_{max}$ とほぼ同程度になると言う問題がある。従って実際的には上記基準とする最大反射率 $R_{max}$ の値を、目的とする最大反射率よりも十分低く設定しておくようにすれば良い。この場合、図8(a)(b)(c)に例示するように最大反射率を低くするに従って波長帯域が若干狭くなるが、上述したように反射率スペクトルの形状がU字形状に近付き、実際的な観点からはより安定した形状の反射率スペクトルが得られることになる。例えば $10^{-5}$ 以下の反射防止膜の設計に対して、基準とする最大反射率 $R_{max}$ の値を $10^{-6}$ とすることによって、図8(c)に例示するような準U字形状の反射率スペクトルを容易に得ることが可能となる。

【0032】かくして本発明の如く条件設定されて形成され、その反射率スペクトルにおいて2つの谷を持ち、その間に最大反射率以下に抑えられた反射率のピークを持つ反射特性を有する多層反射防止膜によれば、低反射率域の広帯域化を効果的に図り得ることが分かる。尚、本発明は上述した実施形態に限定されるものではない。実施の形態では、 $TiO_2$  ( $n=2.378$ ) と  $SiO_2$  ( $n=1.445$ )との2種類の材料を用いて多層反射防止膜を形成したが、3種類以上の材料を用いて多層反射防止膜を形成することも可能である。この場合であっても、前述した光学アドミタンスの不整合条件の下での最適化アルゴリズムに従って各層の厚みを決定するようすれば良い。

【0033】更には前述した最適化アルゴリズムを実行するに際して、層厚 $w_r$ を設定する上でのステップ量 $\delta_{step}$ や、反射率スペクトル $R(\lambda)$ を計算する上での波長ステップ $\lambda_{step}$ についても、要求される層厚精度や計算機の演算処理能力等に応じて設定すれば良い。その他、本発明はその要旨を逸脱しない範囲で種々変形して実施することができる。

#### 【0034】

【発明の効果】以上説明したように本発明に係る多層反射防止膜は、複数種の屈折率の異なる材料からなる薄膜を積層形成した多層構造の反射防止膜であって、その反射率スペクトルが、所要波長領域において反射率の低い2つの谷と、その間に反射率ピークを有する広帯域反射特性を持たせたことを特徴としている。

【0035】具体的には高屈折率材料と低屈折率材料との2種類の薄膜を交互に積層形成する際、各層の厚みを最適化することで、その低反射率波長域における反射率スペクトルに反射率の低い2つの谷が形成されるようにし、且つその谷の間に生じる反射率ピークを目標反射率

以下とし、これによって広波長帯域に亘る低反射率を実現している。従って本発明によれば、半導体レーザ増幅器等の光素子のように広い波長帯域において反射を防ぐに必要な低反射率の反射防止膜を効果的に得ることができる。

【0036】特に請求項2に記載するように、光学アドミタンス不整合条件を与えた有限な反射率の帯域評価に基づく最適化アルゴリズムにより各層の厚みを決定することで、広帯域な反射防止特性を実現し得る多層膜構造を求めるので、その設計に要する処理手続き自体が簡単であり、簡易に、且つ効率的に最適化された多層膜構造を求め得る等の効果が奏せられる。そして本発明によれば反射率を $10^{-3}$ 以下、 $10^{-4}$ 以下、 $10^{-5}$ 以下、 $10^{-6}$ 以下にそれぞれ設定した多層反射防止膜、或いはその波長帯域を $300\text{ nm}$ 以上、 $150\text{ nm}$ 以上、 $100\text{ nm}$ 以上、 $50\text{ nm}$ 以上と広帯域化した多層反射防止膜を得ることができ、特に反射率が $10^{-3}$ 以下でその波長帯域が $300\text{ nm}$ 以上の反射防止膜、反射率が $10^{-4}$ 以下でその波長帯域が $150\text{ nm}$ 以上の反射防止膜、反射率が $10^{-5}$ 以下でその波長帯域が $100\text{ nm}$ 以上の反射防止膜、或いは反射率が $10^{-6}$ 以下でその波長帯域が $50\text{ nm}$ 以上の反射防止膜を得ることができる。

【0037】また上記のような反射率特性（反射防止特性）を有する多層反射防止膜をその端面に形成した半導体レーザ増幅器等の光素子を容易に実現することができる等の効果が奏せられる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る多層反射防止膜の構造を模式的に示す図。

【図2】本発明に係る多層反射防止膜の層構造の決定に用いられる最適化アルゴリズムの処理手順の内の、各層の厚みの決定処理について示す図。

【図3】本発明に係る多層反射防止膜の層構造の決定に用いられる最適化アルゴリズムの処理手順の内の、反射率の演算とその評価処理について示す図。

【図4】領域(1)において [ $R < 10^{-3}$ ] で最適化された層構造における反射率スペクトルを示す図。

【図5】領域(1)において [ $R < 10^{-4}$ ] で最適化された層構造における反射率スペクトルを示す図。

【図6】領域(1)において [ $R < 10^{-5}$ ] で最適化された層構造における反射率スペクトルを示す図。

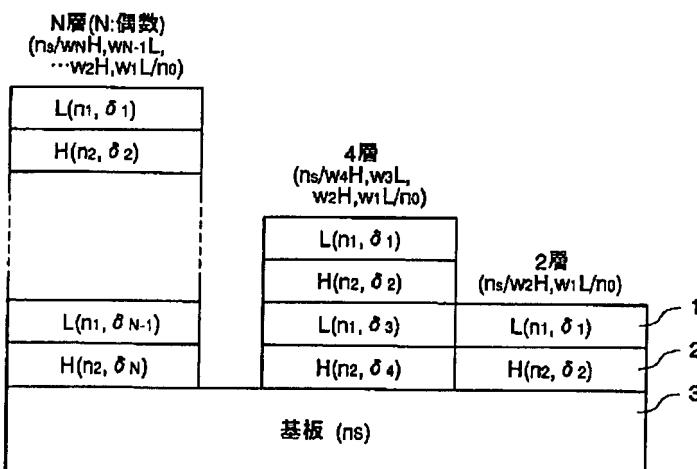
【図7】領域(1)において [ $R < 10^{-6}$ ] で最適化された層構造における反射率スペクトルを示す図。

【図8】領域(1)において最大反射率を $10^{-5}$ 以下としたときの不整合条件 $\Delta$ に対する反射率スペクトルの変化を示す図。

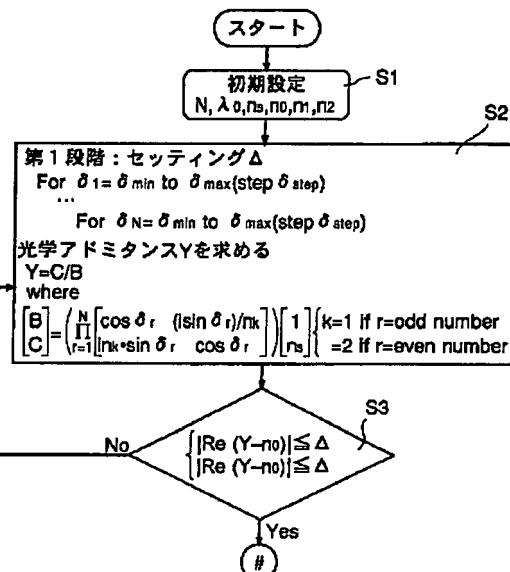
#### 【符号の説明】

- 1 低屈折率材料
- 2 高屈折率材料
- 3 基板

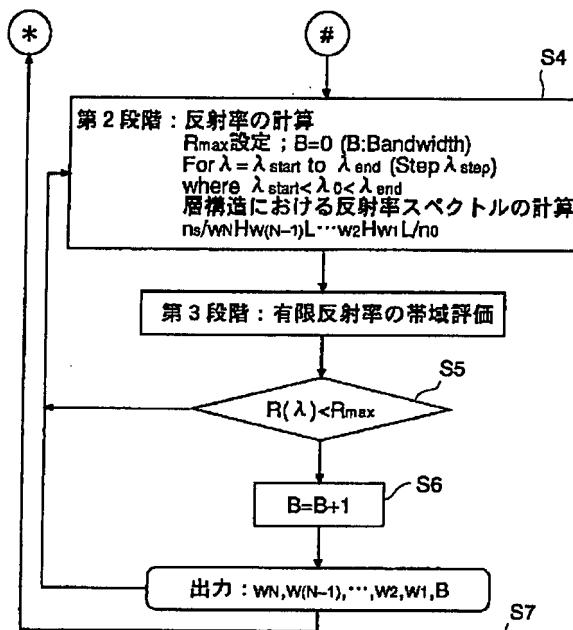
【図1】



【図2】

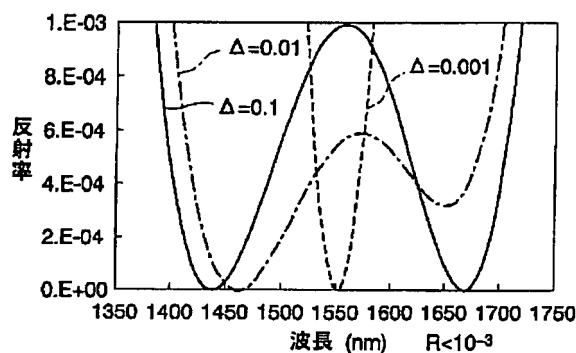


【図3】

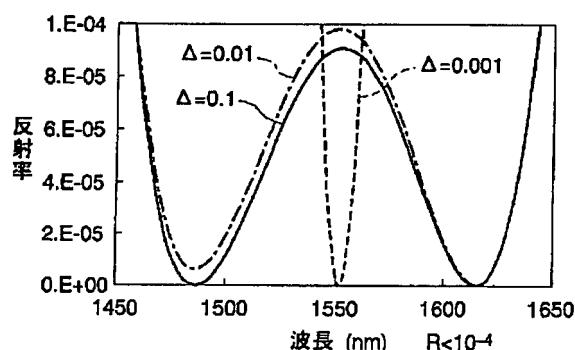


$R(\lambda) < R_{\max}$ となるポイント数のもっとも大きい  
係数  $w_r$  の組を、反射防止幕の各層の厚みとして  
決定し、中心波長合わせを行って出力する。  
中心波長合わせ：  
 $w=w_r \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_c} \right)$   
ここで、 $\lambda_c=(\lambda_H+\lambda_L)/2$ 、 $\lambda_H$  と  $\lambda_L$  はそれぞれ  
 $R(\lambda) < R_{\max}$  を満たす上限と下限の波長

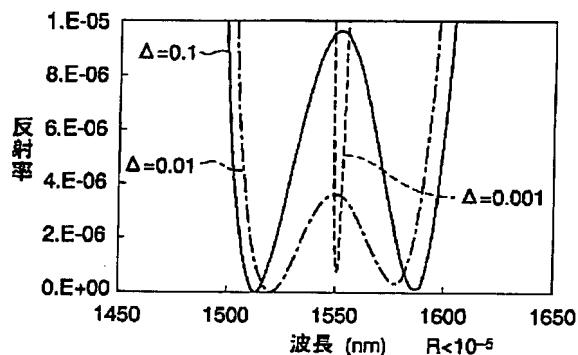
【図4】



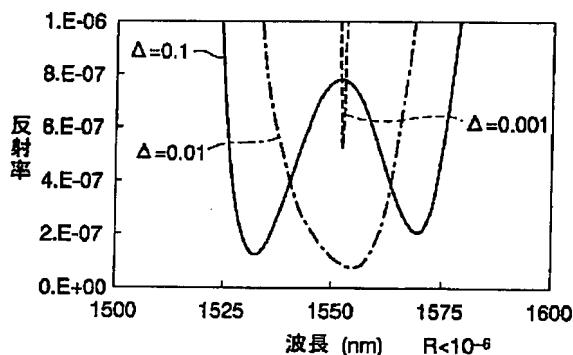
【図5】



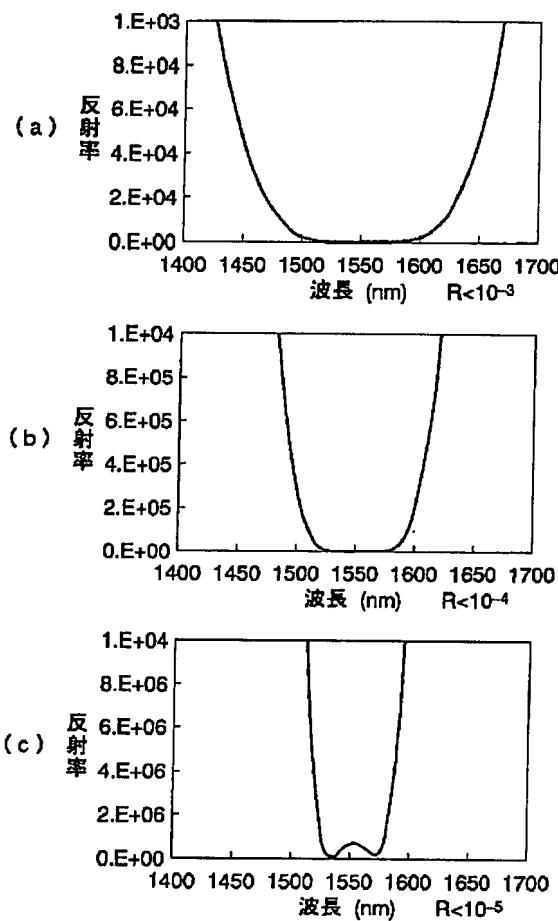
【図6】



【図7】



【図8】




---

フロントページの続き

(72)発明者 神谷 武志

東京都文京区本郷7丁目3番1号 東京大学工学部電子工学科内

(72)発明者 李 正根

東京都目黒区五本木3丁目11番5号 サンハイツ202

(72)発明者 内山 誠治

東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内